



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

JOONA VEHMAS

AUTOMAATTISTEN MATERIAALINKÄSITTELYJÄRJESTELMIEN
JA –TEKNIIKOIDEN KEHITYS

Kandidaatintyö

Tarkastaja: professori Jose Martinez
Lastra / Matti Aarnio
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
4. tammikuuta 2018

TIIVISTELMÄ

JOONA VEHMAS: Automaattisten materiaalienkäsittelyjärjestelmien ja –tekniikoiden kehitys

The development of automated material handling systems and technologies

Tampereen teknillinen yliopisto

Kandidaatintyö, 29 sivua

Tammikuu 2018

Automaatiotekniikan kandidatin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Automaatiotekniikka

Tarkastaja: Jose Martinez Lastra / Matti Aarnio

Avainsanat: Vihivaunut, mobiilirobotit, tuotantolinjat ja kuljettimet, lennokit

Automaattiset materiaalinkäsittelyjärjestelmät ovat kokonaisuuksia, jotka sisältävät erilaisia tuotantolinjoja, kuljettimia, vihivaunuja ja mobiilirobotteja. Nykypäivänä myös lennokit ovat tulleet osaksi näitä järjestelmiä. Järjestelmässä sen osatekijät kommunikoivat keskenään tietokoneen välityksellä. Tietokoneella voidaan luoda paras toimintasuunnitelma tehtaaseen kuin varastoonkin. Näitä järjestelmiä käytetään siirtämään tuotteita tehtaasta oikeisiin työstövaiheisiin ja sen jälkeen varastoimaan tuote oikeaan paikkaan varastossa.

Työ on tehty kirjallisuusselvityksenä. Lähteinä on käytetty alan kirjoja, artikkeleita ja uutisia. Työ on jaettu neljään osioon, joissa kussakin käsitellään aikakausille tyypillisiä järjestelmiä (käytetyt teknologiat) ja sitä, miten ne ovat kehittyneet nykypäivään mennessä. Viimeisessä osiossa on myös katsottu hieman lähitulevaisuuteen.

Automaattisilla materiaalinkäsittelyjärjestelmillä saavutetaan huomattavia parannuksia työn tehokkuudessa ja tuottavuudessa sekä vähennetään ihmisten tarvetta raskaissa töissä. Näiden järjestelmien ensiaskeleet ovat noin 1800-luvun alusta, mutta moderni aikakausi alkoi vasta 1900-luvulla toisen teollisuuden vallankumouksen aikaan. Aluksi järjestelmät koostuivat puhtaasti tuotantolinjoista ja kuljettimista. Autonomisten robottien kehitys alkoi 1950-luvulla ja se on jatkunut aina tähän päivään saakka. Nykypäivänä lennokit ovat tulleet osaksi järjestelmiä.

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
2.	ENSIMMÄINEN AIKAKAUSI	3
2.1	Tuotantolinjojen synty	3
2.2	Vihivaunut monipuolistamaan tuotteiden liikkuvuutta.....	4
3.	TOINEN AIKAKAUSI – VIHIVAUNUJEN KEHITYS ALKAA.....	7
3.1	Tekniikan kehitys mahdollisti vihivaunujen kehityksen	8
3.2	Modernien tuotantolinjojen synty.....	9
4.	KOLMAS AIKAKAUSI – NYKYPÄIVÄN TEKNIIKAT VAKIINTUVAT	11
4.1	Paikan määrittäminen ja navigointi	11
4.2	Ohjaus ja kommunikaatio	14
4.3	Energianlähteet ja renkaat	16
5.	NELJÄS AIKAKAUSI JA TULEVAISUUS.....	19
5.1	Autonomisoituja varastoja	20
5.2	Tulevaisuuden tekniikoita autonomisissa roboteissa ja tehtaissa.....	21
5.3	Lennot tulevaisuuden tehtaissa ja varastoissa	22
6.	YHTEENVETO	26
	LÄHTEET	27

1. JOHDANTO

Suomen bruttokansantuote on kasvanut 215,6 miljardiin euroon vuoteen 2017 mennessä. Suomen bruttokansantuotteen arvonlisäyksestä noin 17 % tuli teollisuudesta ja noin 5 % kuljetuksesta ja varastoinnista vuonna 2016. Prosenttiosuudet ovat pysyneet suurin piirtein samalla tasolla ainakin 2010-luvulla, mikä kertookin teollisuuden kasvusta ja sen merkittävydestä nyt ja tulevaisuudessa. [1] Myös suuremmissa teollisuusvaltioissa materiaalin käsittelyn, tuotannon, kuljetuksen ja varastoinnin osuudet ovat suuret. Näiden rooli olikin yli 20 % Yhdysvaltojen kansantaloudesta vuonna 2016. [2] Teollisuuden kasvaessa tulee kysymykseen varastojen ja materiaalin käsittelyn tehostaminen, millä voidaan saavuttaa suuriakin hyötyjä esimerkiksi tarvittavan työvoiman vähentyessä sekä materiaalien kiihtyneen siirtelyn vuoksi. [3]

Nykyään lähes jokainen fyysinen kaupankäynnin tuote on siirretty jonkinlaisella tuotantolinjalla, trukilla tai jollakin muulla materiaalin käsittelyyn tarkoitettulla koneella. Nykyään monet materiaalinkäsittelykoneet ovat semi-automaattisia, mutta koneälyn, tunnistuksen ja robotiikan kehitys sekä niiden hinta-laatusuhteen aleneminen mahdollistavat useimpien vaiheiden täydellisen automatisoinnin tulevaisuudessa. [4] Materiaalin käsittelyllä on useita erilaisia määritelmiä. Tässä työssä materiaalin käsittelyllä tarkoitetaan tuotteen siirtelyä ja varastointia eikä esimerkiksi materiaalin työstämistä. Tähän tarkoitukseen on kehitelty vuosien saatossa erilaisia menetelmiä ja tekniikoita. Tuotantolinjat ja -kuljettimet ovat usein käytettyjä esimerkiksi auto-, lääke- ja elintarviketeollisuudessa. Vihivaunuilla onkin ollut suuri merkitys autoteollisuuden kehityksessä. Automaattisesti ohjautuvia vaunuja (Automatic Guided Vehicles) eli vihivaunuja käytetään siirtelemään tuotteita esimerkiksi varastoissa. Myös lennokkien käyttö varastoilla on yleistymässä niiden saatavuuden parantumisen ja hintojen laskun seurauksena viime vuosina.

Tämä kandidaatintyö on tehty osana tekniikan kandidaatin tutkintoa. Kandidaatintyön tavoitteena on lisätä tietoisuutta materiaalin käsittelyn automatisoinnissa käytetyistä vihivaunuista, muista autonomisista roboteista, tuotantolinjoista, lennokeista ja kokonaan automatisoiduista varastoista. Niiden sisältämät tekniikat ja hyödyt pyritään käymään aihealueittain, järjestyksessä vanhimmasta alkaen. Tavoitteena on myös katsoa tulevaan, siihen, kuinka automaattinen materiaalin käsittely tulee kehittymään lähivuosina. Tämä kandidaatintyö on toteutettu kirjallisuusselvityksenä. Työssä käytetyt lähteet ovat alan kirjallisuutta, artikkeleita, tutkimuksia ja yritysten tai yhtiöiden julkaisemaa, julkisesti saatavilla olevaa tietoa.

Työ on jaettu johdantoon, teoriaosuuteen ja lopputuloksiin. Teoriaosia ovat luvut 2-5, joissa käydään läpi automaattisessa materiaalin käsittelyssä käytettäviä koneita ja laitteita

sekä niiden sisältämää tekniikkaa. Luvussa kaksi perehdytään tuotantolinjoihin ja ensimmäisiin vihivaunuihin. Luku kolme sisältää toisen aikakauden tuotantolinjat ja vihivau-
nut. Luvussa neljä käydään syvemmin läpi vihivaunujen ja autonomisten robottien sisäl-
tämistä tekniikoista yleisimmät: navigointi, ruuhkan hallinta, reitin valinta ja ohjaustek-
niikat. Viimeisessä luvussa käydään läpi FMS (Flexible Manufacturing System) ja vii-
mevuosien tuomat lisät autonomisiin robotteihin ja tuotantolinjoihin sekä niiden tulevai-
suuden näkymiä. Tulevaisuus tuo tullessaan myös lennokit tehtaisiin ja varastoihin, joten
myös niihin tutustutaan.

Aihealue on hyvin laaja, joten työ on rajattu tehtaan ja varastojen sisälle. Veden- ja maan-
alainen materiaalinkäsittely rajataan pois. Työssä materiaalinkäsittelyllä tarkoitetaan ma-
teriaalien siirtelyä tehtaan tai varaston sisäpuolella, eikä tuotannossa tapahtuvaa materi-
aalien työstämistä. Pois suljetaan myös ihmisten siirtelyyn käytettävät laitteet, mutta mo-
nia autonomisia robotteja voidaan soveltaa varmasti siihen tarkoitukseen, mikäli ihmisten
kuljettamiseen liittyvät standardit täyttyvät. Työssä keskitytään täysin automaattisiin ma-
terialinkäsittelyn tekniikkoihin. Saatavilla olevien tietojen vuoksi teksti painottuu auto-
nomisiin robotteihin. Lennokit eivät vielä ole yleisesti käytössä varastoissa, mutta ne tar-
joavat mahdollisuuksia tulevaisuudessa, minkä vuoksi ne käydään lyhyesti läpi. Autono-
misissa roboteissa painotetaan soveltuvuutensa vuoksi renkaiden päällä liikkuvia robot-
teja.

2. ENSIMMÄINEN AIKAKAUSI

Tuotantolinjoilla ja kuljettimilla tarkoitetaan mekaanista laitetta, joka kuljettaa esimerkiksi hihnalla tai erilaisilla tarraimilla tuotteita ennalta määrättyä reittiä pitkin paikasta toiseen. Nämä linjat voivat kulkea lattiatasolla tai ilmassa pään yläpuolella. Nykyaikana ne käyttävät voimansiirtoon sähkömoottoreita. Tuotantolinjojen hyviin puoliin kuuluvat muun muassa niiden kestävyys, stabiilius, mahdollisuus kuljettaa erimuotoisia ja -painoisia tuotteita, matala onnettomuusriski, mahdollisuus monitasoiseen järjestelmään, helppo modifioitavuus, hyvä kannattavuus ja helppo asennus. [5] Tuotantolinjojen yhteydessä käytetään erilaisia suojaimia ja kaiteita turvallisuuden parantamiseksi. Tuotantolinjat on myös pystyttävä pysäyttämään hätäseis-painikkeella.

2.1 Tuotantolinjojen synty

Tuotantolinjojen historia ulottuu peräti 1800-luvun alkuun ja on näin ollen vanhin tekniikka automaattisissa materiaalinkäsittelyjärjestelmissä. Aikaisemmin oli käytössä ihmisten tuottamalla voimalla liikutettavia tuotantolinjoja, mutta ensimmäinen itse toimiva tuotantolinja oli käytössä vuonna 1804. Se oli Britannian laivaston käytössä ja toimi höyryvoimalla. 1900-luvulle tultaessa teollisuuden vallankumous aloitti tuotantolinjojen varsinaisen kehityksen. Materiaalina pystyttiin käyttämään terästä ja kehitettiin ensimmäinen rullakuljetin, jossa käytettiin sisäisiä kuulalaakereita. 1800-luvulla tuotantolinjoja käytettiin kuljettamaan kaivosteollisuuden tuotteita. [6]

Henry Ford aloitti toisen teollisuuden vallankumouksen vuonna 1913, jolloin hän otti käyttöön ensimmäinen kuljetinhihnaisen kokoonpanolinjan, joka näkyy kuvassa 1. Pian tuotantolinjajärjestelmät olivat käytössä lähes kaikissa tuotantolaitoksissa. Vuonna 1920 alettiin käyttää kumia ja puuvillaa tuotantolinjan materiaaleina. Tämä kesti noin 20 vuotta, kunnes kehitettiin synteettiset materiaalit, jotka ovat käytössä vielä nykyäänkin. Vuonna 1957 keksittiin ja patentoitiin ”Turnover”-tekniikka, jossa kuljetinhihna käännettiin ylösalaisin linjan alapuolella, jolloin hihnan elinikä pitenee tasaisemman kulumisen seurauksena. Ensimmäisen aikakauden tuotantolinjajärjestelmät olivat suhteellisen yksinkertaisia. [7]



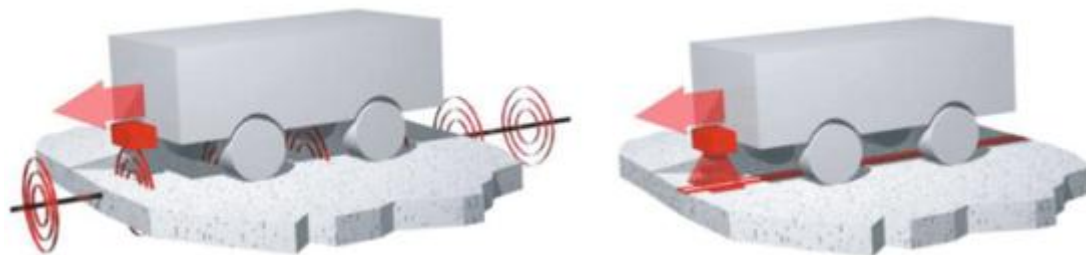
***Kuva 1.** Kuvassa ensimmäisiä kokoonpanolinjoja Fordin tehtaalta vuonna 1913 [8].*

Ensimmäisellä aikakaudella yleisimmät tuotantolinjajärjestelmät ja kuljettimet olivat hihnakuljettimia, joissa hihna liikkuu ja tuotteet sen päällä liikkuvat sen mukana. Toinen vastaava periaate on rullakuljettimet, joissa hihna on korvattu vierekkäisillä rullilla, joita pyöritetään esimerkiksi reunoilla menevällä ketju-ratasyhdistelmällä. Nämä olivat joko painovoimalla tai sähkömoottoreilla toimivia. Kolmas erittäin yleinen on ketjukuljetin, jossa ketjua pyöritetään moottorilla. Ketjukuljettimessa voidaan käyttää esimerkiksi erilaisia koukkuja tuotteiden kiinnittämiseen. Lisäksi käytetään pään yläpuolella kulkevia kuljettimia. Niissä voidaan käyttää magneetteja, koukkuja ja erityistyökaluja. Kyseiset tyypit ovat käytössä vielä nykyäänkin. [9]

2.2 Vihivaunut monipuolistamaan tuotteiden liikkuvuutta

Vihivaunut keksittiin 1950-luvulla Amerikassa, ja siitä lähtien niitä on kehitetty yrityksen intralogistisiin tarpeisiin yhdessä tuotantolinjojen ja kuljettimien kanssa. Niitä voidaan käyttää esimerkiksi kuljettamaan tuotteita tuotantolinjamaisesti läpi tehtaan taikka vieämään tuotteita toiselle työpisteelle tai varastoon. Vihivaunujen teknologisen kehityksen voidaan katsoa alkaneen autoteollisuudesta. Vihivaunujen noin kuusikymmentävuotinen historia voidaan jakaa neljään aikakauteen. Ensimmäisellä aikakaudella teknologia oli hyvinkin yksinkertaista. Järjestelmät olivat rataohjattuja ja turvallisuutta varten pusku-reissa oli hätäpysäytyskahvat mekaanisilla kytkimillä. Rataohjauksella tarkoitettiin tekniikkaa, jossa vihivaunun reitille tehtiin railo, jossa kulkee sähköä johtava metallinen vai-

jeri tai johto noin tuuman lattiatason pinnan alapuolella. Vajeriin aiheutetaan indusoitunut magneettikenttä, jota vihivaunu seuraa haluttuun paikkaan reitin varrella sijaitsevalle lastausasemalle. Näille asemille upotettiin lattiaan koodatut magneetit, jotka vihivaunun sensorit tunnistavat. Koodaus perustui positiivisesti tai negatiivisesti suuntautuneiden magneettien kohdistamiseen. Nykyään rataohjaus tunnetaan induktiivisena rataohjauksena. [10, s. 1–5]



Kuva 2. Vasemmalla induktiivinen rataohjaus ja oikealla optinen rataohjaus [10, s. 102].

Englannissa vuonna 1956 markkinoille tullut yritys, EMI, käytti omissa vihivaunuissaan optisia sensoreita, jotka tunnistivat lattiassa olevan värjätyn radan ja toimivat sen signaalin mukaan (kuvassa 2 oikealla). 1960-luvulta lähtien alettiin vihivaunuissa käyttää transistoripohjaista elektroniikkaa, joka lisäsi joustavuutta sen liikkeiden ohjauksessa ja navigoinnissa. Samaan aikaan Saksassa yritykset Jungheinrich ja Wagner alkoivat automatisoida käsikäyttöisiä trukkeja ja alustakoneita. Vuonna 1962 Jungheinrich otti käyttöön ensimmäisen automaattisen induktio-ohjatun ”Teletrak”-nosturin. Tämä käytti myös optista rataohjausta, kuten EMI:n vihivaunut. Vuonna 1963 Wagner alkoi markkinoida vihivaunuja autoteollisuudessa ja kaupallisessa kaupankäynnissä. [10, s. 3]

Alusta alkaen vihivaunuille keskittyivät tietyt osa-alueet, jotka ovat vielä nykypäivänäkin osana jokaista vihivaunujärjestelmää. Osa-alueet ovat ohjausjärjestelmä, radanohjausjärjestelmä, vaunun ohjaus ja henkilöturvallisuus. Vihivaunujen toimintaympäristöä muokattiin vähitellen täysin automatisoiduksi tehtaaksi tai varastoksi. Kuitenkin vielä vuonna 2017 varastoissa ja tehtaissa työskentelee ihmisiä erilaisissa tehtävissä, minkä seurauksena otettiin käyttöön suojoimenpiteitä, kuten varoitusmerkinnät. Teknologioiden kehittyessä syntyy myös vastustajia ja kysymyksiä. Yhdysvalloissa raportoitiin vastustusta työpaikkojen menetyksen pelossa. 1960-luvun puolivälissä otettiin käyttöön ensimmäiset yksittäiset kuljetusjärjestelmät elintarviketeollisuudessa. Vihivaunujen valikoima rajoitui pääasiassa trukkeihin, vetoajoneuvoihin ja lava kulkuneuvoihin. [10, s. 4]

Ensimmäisen aikakauden tekniikat olivat yksinkertaisia. Vaunut seurasivat ennalta määritettyä reittiä asemalta asemalle. Ne lähtivät liikkeelle saatuaan ohjaussignaalin ja pysähtyivät tunnistettuaan pysähdysmerkinnän. Toisin sanoen vaunulla oli vain yksi suunta eli eteenpäin. Järjestelmän muokkaus oli vielä suhteellisen työlästä kiinteän reitinvalinnan takia. Yksinkertaiset sähkö- ja magneettisensorisysteemit olivat riittäviä. Vaunut toimivat

hyvin pidempien etäisyyksien siirtoihin, ja pysähdykset sujuivat moitteitta. Puolijohde-tekniikka alkoi kehittyä 1960-luvun lopulla, mikä mahdollisti osittain tyhjiöputkista luopumisen jatkossa. Samaan aikaan ensimmäinen automaattinen vetovaunullinen traktori kehitettiin. [10, s. 4–5]

Vihivaunuja on muutamia erilaisia, ja niitä pystytään muokkaamaan erilaisia kuormia varten sopivammiksi. Ensimmäiset vihivaunut olivat veto-tyyppisiä vaunuja, jotka vetävät erilaisia perävaunuja, joihin voidaan lastata erittäinkin suuria kuormia. Vetovaunut ovat käytännöllisyytensä takia käytössä vieläkin. Toinen yleisesti vahvasti käytössä oleva tyyppi on automaattinen trukki. Trukkien nostokorkeudet voivat vaihdella huomattavasti käyttötarkoituksesta mukaan. Monet vihivaunut ja mobiilirobotit ovat tasollisia vaunuja, eli vaunun yläosa on tasainen taso, jota voidaan liikuttaa ylös, alas sekä sivuille. Näistä malleista on erilaisia versioita ja hybridejä, joissa saattaa olla nämä kaikki edellä mainitut ominaisuudet samassa. Vaunujen koko ja kuormakestävyys saattavat vaihdella huomattavasti käyttötarkoituksen mukaan. [10, s. 132–142]

Henry Ford totesi, että kuluttaja voi tilata minkä tahansa värisen auton, kunhan se on musta. Kyseisessä lauseessa todettiin usean aikakauden ongelma eli järjestelmän joustavuuden puute, johon ratkaisuja on saatu vasta 2000-luvulla. Tämän vuoksi kehittyi käsite Flexible manufacturing system (FMS), jossa tietokoneohjattu järjestelmä voi tuottaa erilaisia tuotteita tai osia missä tahansa järjestyksessä. Noin vuonna 1960 otettiin käyttöön ensimmäinen numeerisesti ohjattu laite, joka tunnetaan CNC-koneena (Computerized Numerical Control). [11]

3. TOINEN AIKAKAUSI – VIHIVAUNUJEN KEHITYS ALKAA

Toinen aikakausi sijoittui 1970-luvun alusta 1990-luvun alkuun. Tuona ajanjaksona keksittiin esimerkiksi yksinkertaiset ajotietokoneet ja valtavat ohjauskaapit. Aktiivisesta induktioradanohjauksesta tuli normi ja opittiin käyttämään railoon upotettua vaijeria tiedonsiirtoon. Tiedonsiirtoon vaijeria pitkin käytettiin infrapunasäteitä ja radiosignaaleja. Virta otettiin vaihtovirtalatausjohtimesta indusoiden vaunun alle sijoitetut kaksi käämiä, joita käytettiin ohjausmoottorin ohjaamiseen. Ajoneuvon ohjaus perustui lohko-osan ohjaukseen, joita käytettiin rautateillä. Nämä suuret ohjauskaapit olivat välttämättömiä ja sillä niitä voitiin käyttää vaunujen törmäyksien ja reitin estämisen välttämiseen. 1970-luvulla alettiin ymmärtää automaation hyötyjä pääosin tuotantokustannuksien laskemisessa. Sen seurauksena syntyi kysyntä entistä korkeamman asteena automaatiolle ja siitä tarve kehittää automaation tekniikoita pidemmälle. Komponenttien valmistajien ja kehittäjien määrän kasvu mahdollisti järjestelmien ominaisuuksien ja joustavuuden parantamisen. [10, s. 6–7] Autonomisten mobiilirobottien kehittäminen etenkin sotilaskäyttöihin alkoi toisella aikakaudella. [12]

Autonomiset robotit sisältävät vihivaunut ja mobiilirobotit. Mobiiliroboteille ei ole tarkkaa käsitettä cross-automationin verkkosivujen mukaan. [13] Introduction to Autonomous Mobile Robots –kirja sisällyttää vihivaunut ja mobiilirobotit autonomisiin mobiiliroboteihin [12, s. 1–423], joten niiden sisältämät tekniikat soveltuvat niihin molempiin. Vihivaunut ja mobiilirobotit ovat hyvin samankaltaisia, koska molemmilla on sama tehtävä: siirtää tuotteita paikasta A paikkaan B. Niiden tekniikoissa on kuitenkin eroavaisuuksia. Vihivaunut käyttävät navigointiin usein ratoja, kun taas mobiilirobotit tunnustelevat ympäristöään koko ajan. Tämä näkyy esimerkiksi tilanteissa, joissa mobiilirobotti kohtaa esteen. Vihivaunun pysähtyessä esteelle, mobiilirobotti kiertää sen ja etsii parhaan reitin nopeasti. Mobiilirobotit luovat uuden kartan ja oppivat helposti uusia määränpäitä. Mobiilirobotit perustuvat vahvasti algoritmeihin. [13]

Fetch roboticsin mukaan vihivaunut ovat ikään kuin vanha sukupolvi verrattuna autonomisiin roboteihin. Ne käyttävät samoja teknologioita, mutta määriteltäessä niitä huomataan autonomisten mobiili robottien olevan erilaisia juurikin tilanteissa, joissa ne kohtaavat esteen. [14] Nykyaikaiset ja etenkin tulevaisuuden vihivaunut käyttävät myös ympäristön 3D-mallinnusta ja sen ohjelmistopuolen kehitys mahdollistaa toiminta-alueen laajentamisen, itsenäisen reitin valinnan ja se pystyy tunnistamaan esteet kiireellisessäkin ympäristössä. [15] Eli autonomisia mobiilirobotteja voidaan pitää uudemman sukupolven vihivaunuina, eikä niitä ei voida täysin erotella toisistaan. Tämän vuoksi kandidaatin työssä puhutaan pääasiassa vihivaunuista, joiden tekniikoita on enemmän ja joita on

aluksi käytetty enimmäkseen vihivaunuissa. Eri lähteiden aiheuttamien ristiriitojen vuoksi tekstissä käytetään yleisesti käsitettä autonominen robotti, mikä sisältää vihivaunut ja mobiilirobotit. Lähteestä riippuen pyritään käyttämään lähteessä esiintyvää käsitettä.

Tehtäisiin sopivat paremmin renkailla varustetut autonomiset robotit kuin esimerkiksi jaloilla liikkuvat robotit toimintavarmuuden, stabiiliuden ja yksinkertaisemman järjestelmän vuoksi. Myöskään monet esimerkiksi humanoidi tyyppiset robotit eivät ole ideaalisia kuormien siirtelyihin. Renkaalliset autonomiset robotit tarjoavat hyvän tehokkuuden, helpon mekaanisen rakenteen ja toiminnan. Niiden huonot puolet voidaan karsia varastoissa suhteellisen hyvin, koska lattia voidaan pinnoittaa sopivaksi ja maasto on tasainen. [12]

3.1 Tekniikan kehitys mahdollisti vihivaunujen kehityksen

1970-luvun markkinat ja kehitys tarjosivat paljon erilaisia parannuksia. Korkeatehoinen elektroniikka ja mikroprosessorit mahdollistivat nopeamman laskennan. Nopeampi laskenta taas mahdollistaa monimutkaisempien vaunujen, tuotantolinjojen ja järjestelmien valmistuksen. Ohjelmoitavat logiikat kehitettiin ja niitä pystyttiin hyödyntämään tässä tarkoituksessa. Ohjelmoitavat logiikat paransivat myös tuotantolinjojen ohjausta. Sensoritekniikan parantuessa ja hintojen alentuessa lisäsi esimerkiksi vihivaunun hallintaa. Vaunun paikan tunnistus sensoreilla ja liikkeiden tarkempi hallinta paransi turvallisuutta ja useampaa vaunua pystyttiin hyödyntämään samassa tilassa entistä paremmin. Akkujen kehitys mahdollisti pidempiaikaisemman käytön. Automaattinen akun lataus kehitettiin ja sillä pystyttiin saavuttamaan jatkuvuus toimintaan. [10, s. 6–7]

Edellisissä kappaleissa käsitellyt parannukset mahdollistivat ensimmäiset sovellukset, joissa vaunun peruuttaminen, kuorman purkaminen ja liikkuminen yli ennalta määritettyjen rajojen oli mahdollista. Vihivaunuja alettiin käyttää kokoonpanolinjan korvikkeena liikkuvana työpisteenä. Niitä pystyttiin käyttämään tuotannossa, valmiiden tuotteiden siirtelyssä ja varastoinnissa. Vihivaunut soveltuivatkin näin ollen erinomaisesti autoteollisuuteen. Sen seurauksena autoteollisuuden volyymi etenkin Saksassa kasvoi huomattavasti. 1980-luvun loppuun mennessä ei oltu kuitenkaan saavutettu haluttua järjestelmien joustavuutta käytännössä ja järjestelmät miellettiin kalliiksi. Reittien uudelleen ohjelmointi oli kallista ja luotettavuus ei vakuuttanut käyttäjiä. Suuret autonvalmistajat Volkswagen, BMW ja Mercedes Benz päättivät, että vihivaunujen ekonomista tehokkuutta ja yhteensopivuutta on parannettava. He loivat yhdessä saksan insinööriliiton kanssa asian tuntijapaneelin vuonna 1987, joka käsitteli näitä aiheita. Vuonna 2006 luotiin AGVS Forum (Automated Guided Vehicle Systems Forum), joka sisältää keskeiset alan toimijat Euroopasta. Se seuraa ja ohjeistaa vihivaunujen toimialaa. [10, s. 8–9]

1980-luvun lopussa vihivaunuteollisuus koki hetkellisen pysähdyksen, kun Massachusetts Institute of Technology (MIT) tutkimus osoitti, että japanilaiset pystyivät valmistamaan paremman laatuista autoja alemmilla tuotantokustannuksilla. Monet valmistajat luopuivatkin vihivaunujen kehityksestä. Tämä taantuma lopetti toisen aikakauden. [10, s. 10]

3.2 Modernien tuotantolinjojen synty

Vuonna 1970 työterveys- ja työturvallisuusvirasto vaati tuotantolinja järjestelmien melutason alentamista työturvallisuuden parantamiseksi. Sen seurauksena alettiin kehittää hiljaisempia rullia ja käyttämään tarkkuuslaakereita kulumisen ja melun rajoittamiseksi. Seuraavien vuosikymmenien aikana kehitettiin useita parannuksia kuljetintekniikoihin. Näitä tekniikoita olivat esimerkiksi moottoroitu hihnapyörä (moottori rullan sisällä), jossa runko pyöri paikallaan olevan akselin ympäri. Virtajohtimet kulkevat kiinteän akselin läpi moottorin liittimiin. Kyseinen tekniikka säästi tilaa ja alensi ylläpitokustannuksia. Tietokoneiden avulla pystytään hallitsemaan monimutkaisempiakin järjestelmiä ja järjestelmien kyky kommunikoida muiden järjestelmien kanssa on mahdollista. Tämän seurauksena tuotantolinjojen joustavuus parani huomattavasti toisella aikakaudella. [7] Kuvassa 3 nähdään tuotantolinjajärjestelmä tehtaassa.



Kuva 3. Tuotantolinjajärjestelmä tehtaassa [16].

Toisen aikakauden aikana tuotantolinjoissa käytettävien materiaalien skaala parani merkittävästi parantaen niiden kestävyyttä ja alentaen hintaa. Vuonna 1970 kehitettiin muovista tai synteettisistä kuiduista tehdyistä moduuleista tuotantohihna, jonka kitka ja taipuisuus ominaisuudet tekevät niistä käytännölliset vielä nykypäivänäkin. Kuvassa 4 nähdään moduuleista koottu hihna, jonka korjaaminen on huomattavasti nopeampaa ja käytännöllisempää, kuin one piece -tyyppisen hihnan. Näiden hihnojen kestävyys on myös parempi, joten ne soveltuvat käytettäväksi hyvinkin pienien väkipyörien tai terävien/jyrkkien reunojen yhteydessä. Moduuleista koottu hihna on kalliimpi, mutta jonkin osan hajoessa ei tarvitse vaihtaa kuin palanen siitä. [5]



Kuva 4. Moduuleista koottu tuotantohihna [5].

Kitkaohjausjärjestelmässä hihnan ja rummun/väkipyöran välistä kitkaa käytetään hihnan liikuttamiseen. Ensimmäiset kitkaohjauksella toimivat hihnat tulivat käyttöön vuonna 1985 ja niitä pidetään uuden sukupolven tuotantojärjestelminä. Kyseinen tekniikka laski huomattavasti melutasoja, mahdollisti suuremmat nopeudet, kompaktimmat järjestelmät ja alensi kustannuksia. Tällaisissa järjestelmissä voidaan käyttää yli 360 m/min nopeuksia. [17]

4. KOLMAS AIKAKAUSI – NYKYPÄIVÄN TEKNI- KAT VAKIINTUVAT

Kolmas aikakausi sijoittui 1990-luvun puolivälistä noin vuoteen 2010. Tämän aikakauden vihivaunuissa yleisesti on sähköinen reitin valinta ja kontaktivapaat sensorit. Niitä ohjataan normaalilla tietokoneella. Navigoinnissa ei tarvita enää kaapeleita vaan voidaan käyttää klassista ”vapaata” navigointitekniikkaa. Tällaisia tekniikoita on muun muassa magneettinen ja lasernavigointi. Tiedonsiirrossa WLAN vakiinnutti oman asemansa. Autoteollisuuden dominointi vihivaunuteollisuudessa väheni, jolloin teknologia alkoi levitä myös muille aloille. Tällä aikakaudella vihivaunujen luotettavuus kasvoi ja ne todistivat arvonsa yrityksen intralogistiikassa. Standardisoinnin myötä saavutettiin hyvä yhteensopivuus, jonka seurauksena valmistajat pystyivät luomaan luotettavia, tehokkaita ja tunnistettuja tuotteita. [10, s. 10, 14]

Kolmannen aikakauden markkinoilla on useita erityyppisiä kuljetinjärjestelmiä erilaisiin tarpeisiin. Järjestelmissä voidaan käyttää liukuradallisia, pyörä- tai rullalinjoja, hihnakuljettimia, laattahihnoja ja magneettikuljettimia. Näistä on saatavilla erilaisia sovelluksia, kuten tärinällä ja paineilmalla toimivia versioita. Myös erilaisia hissejä ja radallisia kuljettimia (esimerkiksi koukuilla tai kärryillä varustettuja) on paljon käytössä. Järjestelmässä voi olla usean tyyppisiä kuljettimia eri tuotteille, ja siinä voi olla lajittelujärjestelmä. Lajittelu voidaan suorittaa erilaisilla ohjaimilla. Tällaisia ohjaimia ovat esimerkiksi työntökädet ja suunnan ohjaimet, jotka vaihtavat asentoaan ohjatakseen tuotteen eri reitille. Nostolaitteella voidaan nostaa ja siirtää tuote toiselle linjalle. Laattaohjaimilla voidaan työntää tai ohjata tuote sivuraiteelle. Tällaisia ovat esimerkiksi erilaiset kippausjärjestelmät, joissa tuotantolinja on paloitetu osiin ja linja voi kipata itsensä sivuille ja ohjaten tuotteen eri linjalle. [18]

4.1 Paikan määrittäminen ja navigointi

Materiaalivirtojen ja varastoteknologian hallinnan kehittyessä tuotantometodit parantuivat ja kilpailun avautuminen teki vihivaunuista sekä niiden kehityksestä monipuolisempia. Laskenta- ja sensoriteknologian jatkuva paraneminen mahdollistivat suuremmat vau-
nujen nopeudet ja kuorman hallinnan. Tekniikan kehitys mahdollisti matalammat hinnat ja yksinkertaisemmat rakenteet vanhojen monimutkaisempien tilalle. Tietokoneiden pienentyessä niitä voitiin alkaa sisällyttää vaunuihin mahdollistaen entistä pienempien vau-
nujen rakentamisen. Vihivaunuilla pystyttiin 2000-luvulle tultaessa kuljettamaan melkein mitä tahansa kuormaa melkein mihin tahansa. Tavarankäsittely muuttui siis yksipuoli-
sesta kuljetuksesta moniulotteiseksi toiselta aikakaudelta kolmannelle siirryttäessä. Eri-
laiset asemoinnit kuormalle mahdollistavat ergonomisen asennustyön säästämällä työnteki-
joiden terveyttä. Erilaisten työpisteiden määrät tehtaissa ja varastoissa kasvoivat, koska

enää risteävät reitit eivät olleet ongelma WLANin ja parempien sensoreiden takia. Ensimmäiset automaattiset logistiikkayksiköt otettiin käyttöön Japanissa. [10, s. 14–16]

Yleisesti liikuttaessa paikasta toiseen huomioidaan automaattisesti ympäristöämme turvallisuuden takia. Näin ollen myös vihivaunujen ja muiden autonomisten robottien on luonnollisesti otettava huomioon turvallisuus navigoidessaan paikasta toiseen. Navigoidessaan vihivaunun tai autonomisen robotin on ensin paikannettava oma sijaintinsa, mihin sen pitäisi liikkua ja miten se tehdään turvallisesti. [12] Induktiivinen ja optinen radanohjaus on käytössä vielä nykyäänkin, mutta niille tuli vaihtoehtoisia navigointimenetelmiä [10, s. 101].

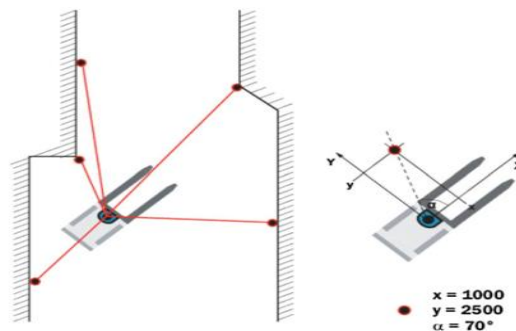
Paikan määrittämiseen ja etenemiseen vihivaunuissa ja autonomisissa roboteissa voidaan käyttää kiinteää koordinaatistoa. Kiinteässä koordinaatistossa luodaan koordinaatisto, jonka sisällä kyseinen vihivaunu voi liikkua. Tässä tarvitaan paikan määrittelyyn laskelmasuunnistusta tai kuvan 5 GPS-järjestelmää (Global Positioning System). Laskelmasuunnistuksessa paikka määritetään sisäisillä sensoreilla, kuten kulmasensoreilla renkaissa ja magneettisella kompassilla. Tämän jälkeen mitataan matka esimerkiksi renkaasta ja arvioidaan sijainti. Tehtaissa käytetään niin kutsuttua LPR-järjestelmää (Local Positioning Radar) tai sisätilan GPS-järjestelmää. Nämä voidaan toteuttaa halvemmilla radiomajakoilla, mutta silloin tarkkuus kärsii ja päästään vain noin 10–30 cm:n tarkkuuteen. Jos tarvitaan todella tarkkoja sijainteja, tarvitaan reaaliaikainen kinemaattinen mitaus-GPS. [10, s. 99–100, 109–110] Tästä löytyy lisätietoa internetistä helposti, joten siihen ei perehdytä tarkemmin.



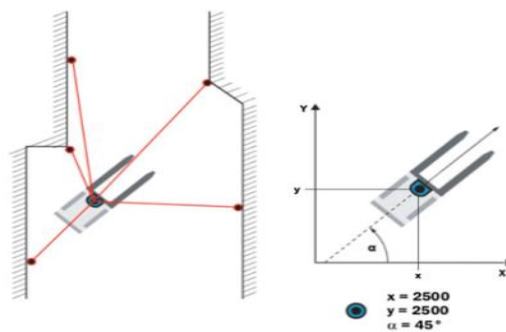
Kuva 5. GPS:n toimintaperiaate [10, s. 110].

Yksi kolmannen aikakauden mullistajista oli ”vapaa” liikkuminen eli vihivaunun ei tarvinnut liikkua tiettyä reittiä pitkin. Tietyn reitin sijaan pystyttiin hyödyntämään koko tilaa ja sitä pystyttiin muokkaamaan virtuaalisesti. Tämä ”vapaa” liikkuminen mahdollistettiin yhdistämällä edellisen kappaleen tekniikoita ankkuripisteiden kanssa. Nämä ankkurit ovat halpoja magneetteja, jotka on upotettu ikään kuin koordinaatistoksi lattiaan. Magneettien etäisyydet riippuvat vaaditusta tarkkuudesta. Magneetin tunnistin tunnistaa magneettikentän voimakkuuden ja yhdessä laskelmasuunnistuksen kanssa laskee tarkan sijainnin. Magneetin tunnistin on liitetty järjestelmään esimerkiksi CANopen (Controller Area Network open) väylällä. Kyseisellä tekniikalla päästään jopa alle 2 mm tarkkuuteen. [10, s. 103–105]

”Vapaan” navigoinnin merkittävin teknologia, joka kehitettiin kolmannella aikakaudella, on lasernavigointi. Se on magneettisen navigoinnin pääkilpailija. Lasernavigoinnissa seinien ja palkkien pintaan laitetaan retro-heijastava kalvo, joita autonomiset robotit voivat käyttää sijaintinsa määrittämiseen (kuva 6 ja 7). Nämä kalvot heijastavat laserin takaisin, mistä tietokone laskee etäisyydet. Etäisyyden määrittämistä varten on oltava näkyvissä vähintään kaksi tai kolme merkintää (kalvoa). Vaunu korjaa asemaansa tarvittaessa, jos mittaustulosten perusteella se on poikennut reitiltänsä. Reitiltä poikkeamat voivat johtua esimerkiksi laitteen kuorman muutoksesta tai renkaiden kulumisesta. Uudet reitit voidaan opettaa viemällä vihivaunu kyseistä reittiä pitkin tai tietokoneella ohjelmoiden. Kuten magneettinen navigointi, niin lasernavigointi on myös yhtä joustava muutoksille. Laserialla voitiin saavuttaa noin 20 mm tarkkuus. [10, s. 105–108]



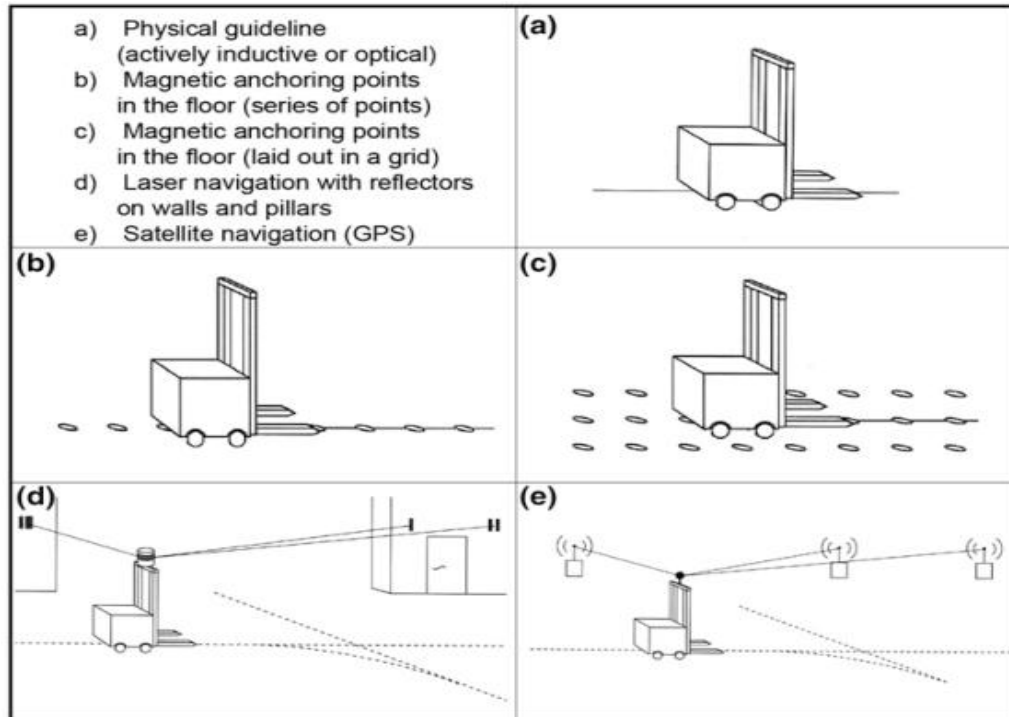
Kuva 6. Vihivaunu tunnistaa maamerkin (kulma) [10, s. 107].



Kuva 7. Vihivaunu tunnistaa sijaintinsa heijastuksista [10, s. 107].

Kehittyneemmät järjestelmät pystyvät tunnistamaan luonnollisia esteitä, mutta kyseinen 3D kartoitus vie huomattavasti enemmän aikaa, mikä luonnollisesti laskee laitteiden nopeuksia. 3D kartoitus on käytössä lähes kaikissa mobiili roboteissa, mikä johtunee erotelusta, jonka mukaan mobiilirobotit tunnistavat esteet ja kiertävät ne. [13] Kuitenkin monissa kolmannen aikakauden lopun ja neljännen alkupuolen vihivaunuissa on ANS (Autonomous Navigation System) eli autonominen navigointijärjestelmä. Tällaisessa järjestelmässä voi olla useita laserskannereita. Yksi tunnistaa normaalit merkinnät kuten aikaisemmin, yksi luo 3D karttaa ja yksi tunnistaa esimerkiksi eteen tulevia esineitä. Yhdessä niillä saadaan luotua tehokas ja turvallinen järjestelmä. Turvallisuuden ja tehokkaan

tuotteiden siirtelyn kehityksessä tärkeässä roolissa on 3D kappaleiden tunnistus. Kolmannella aikakaudella ei vielä ollut standarditekniikkaa tähän tarkoitukseen. Kokeilussa on ToF kamerat (A time-of-flight camera), tutkat ja ultraäänisensorit. Kuvassa 8 selvennetään erilaisia navigointitekniikoita. [10, s. 109, 121]



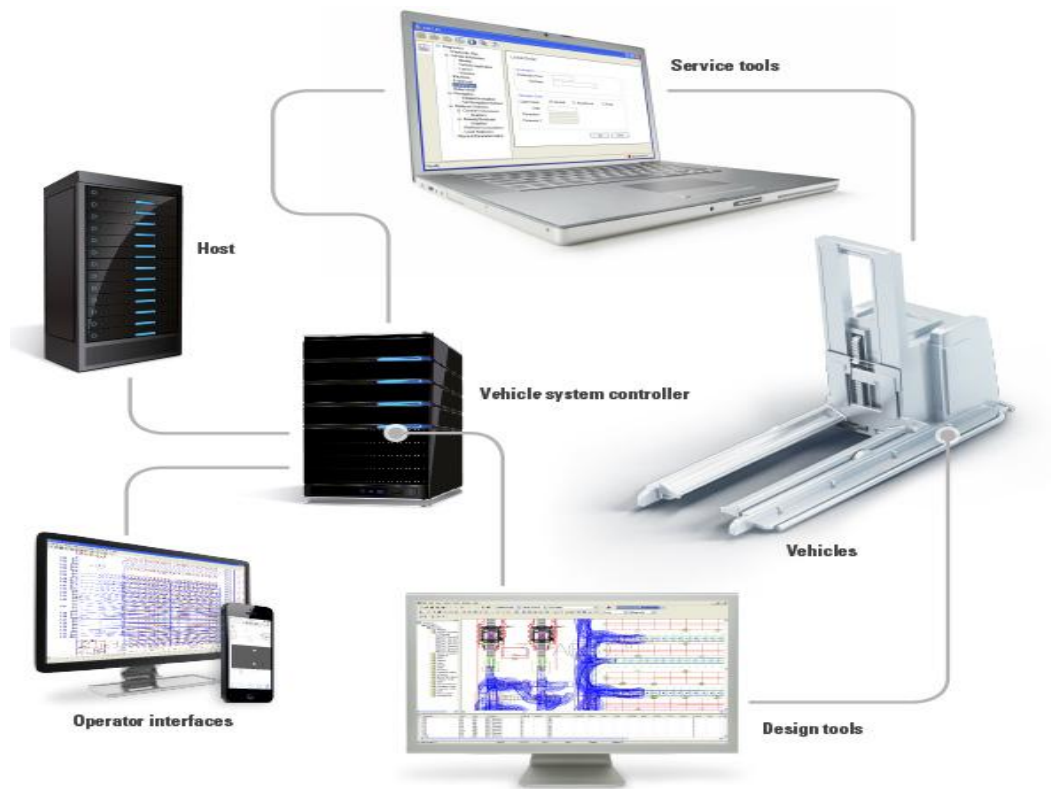
Kuva 8. Selventävä kuva yleisimmin käytettävistä tekniikoista vihivaunuissa [10, s. 101].

Turvallisuuden osalta EU on maailman tiukin. Hyvänä puolena on, ettei näissä EU maissa ole juurikaan sattunut onnettomuuksia vihivaunujen takia. Tämä kuitenkin aiheuttaa muualta tuleville tuottajille ongelmia päästä Euroopan markkinoille. Haittapuolena on tietenkin eurooppalaisten tuotteiden hintojen nousu. Vihivaunujen etenkin turvallisuudelle ja terveydellisille tekijöille on asetettu EU-standardeja, mutta niitä emme käsittele tässä kandidaatin työssä. Yleisesti ottaen tuottajien on tehtävä vihivaunuistansa yleiset turvallisuus- ja terveystvaatimukset täyttäviä. Vihivaunun mukana on toimitettava alkuperäinen ohjekirja, tekninen dokumentaatio, CE-merkintä EU-alueella ja vaunulle on suoritettava riskiarvio. [10, s. 104]

4.2 Ohjaus ja kommunikaatio

Toinen suuri osa-alue autonomisissa roboteissa on ohjaus. VDI (Verein Deutscher Ingenieure) määrittelee tämän seuraavasti: ”Vihivaunun ohjaus systeemi sisältää laitteisto- ja ohjelmistopuolen. Se perustuu tietokoneohjelmaan, jota käytetään yhdellä tai useammalla tietokoneella. Sen tarkoituksena on ohjata useita vihivaunuja ja yhdistää sen sisäisiin toimintoihin.”. Kolmannella aikakaudella lähes kaikki vihivaunut käyttivät tiedon- siirtoon LAN-yhteyttä (Local Area Network), joka oli yhdistetty päätietokoneeseen.

VPN-yhteyttä (Virtual Private Network) taas käytetään tiedonsiirtämiseen pidemmällä etäisyyksillä. Moniserverisissä järjestelmissä käytetään datan turvaamiseen ja varastointiin RAID-tekniikkaa (Redundant Array of Independent Disks), joka parantaa tietokoneiden vikasietoisuutta ja/tai nopeutta. LAN ja VPN ei vain siirrä tietoa vaan yhdistää päätöksentekolaitteet ja oheislaitteet. Esimerkiksi avaa automaattisessa varastossa automaattiovet oikeaan aikaan. Tiedonsiirto hierarkian ylimmälle isäntäserverille tapahtuu paikallisen Ethernet-pohjaisen tietoverkon kautta käyttäen TCP/IP-protokollaa (Transmission Control Protocol / Internet Protocol). Nämä isäntäserverit suorittaa esimerkiksi toiminnanohjausjärjestelmää (SAP), tuotannonsuunnittelua järjestelmää (PPS) ja esimerkiksi varastonhallintajärjestelmää (WAS). [10, s. 122–124] Alla oleva Kollmorgen yrityksen verkkosivujen kuva selventää, mihin vihivaunu ja järjestelmän muut laitteet on yhdistetty ohjelmistopuolella.



Kuva 9. Ohjelmistopuoli [19].

Yllä olevan kuvan mukaisesti ohjelmistopuolella isäntäserveri (host) suorittaa eri varaston ja tehtaan järjestelmiä (SAP, PPS, WAS). Design tool -työkalussa hallitaan vaunun reittejä, lastauspisteitä ja muita toimintoja. Service tool -työkalu hoitaa järjestelmän diagnostiikan ja kunnossapidon. Käyttäjäräjäpinnassa (Operator interface) ihminen valvoo ja ohjaa kokonaisuutta tarpeen mukaan. Kokonaisuus on yhdistetty vaununohjaimeen (system controller), joka hallitsee useiden vaunujen liikennettä tehokkaimmalla tavalla. [19] Käyttäjäräjäpinta (user interface/operator interface) on käyttöliittymä, jonka kautta käyttäjä käyttää järjestelmää. Kokonaisuutta kutsutaan ohjauksen ohjausjärjestelmäksi (guidance control system). Kyseinen ohjausjärjestelmä laskee parhaan/tehokkaimman

toimintasuunnitelman ja pistää sen käytäntöön. Vaativimmat järjestelmät laskevat kannattavuuden esimerkiksi etäisyyksien, reittien, aikataulujen, useamman toiminnon integroinnista, ohjaa tarpeettomat vaunut lataamaan itsensä ja esimerkiksi ennustaa tulevia tapahtumia pidemmän ajan tilausdatasta. [10, s. 124–131]

Ruuhkan ohjausjärjestelmä sisältyy ohjauksen ohjausjärjestelmään. Sillä tarkoitetaan osaa, joka laskee vaunujen reittejä mahdollistaakseen mahdollisimman vapaan liikkumisen eli toisin sanoen välttää ruuhkatilanteita. Ruuhkanhallinnassa on pitkään käytetty rautateillä käytössä olevaa järjestelmää, jossa rautatiet on jaettu lohkoihin ja jos vaunu on lohossa, niin sinne ei saa muut vaunut tulla. [10, s. 100, 144–146]

Kuvan 7 design tool -työkalussa mallinnetaan järjestelmän layouttia eli lastauspaikat, latauspisteet, lohkot, vaunujen fyysiset mitat ja oikeastaan kaikki, mitkä vaikuttavat autonomisten robottien reitteihin. Niiden perusteella luodaan malli sopivista liikeradoista. Tätä mallia käytetään ruuhkanhallinnassa ja se linkittyy koko ohjausjärjestelmän toimintaan. Ohjausjärjestelmä sisältää myös oman diagnostiikan ja tilastoinnin, joilla se testaa jatkuvasti oman toimintansa tarkkuutta ja luotettavuutta. [10, s. 144–146]

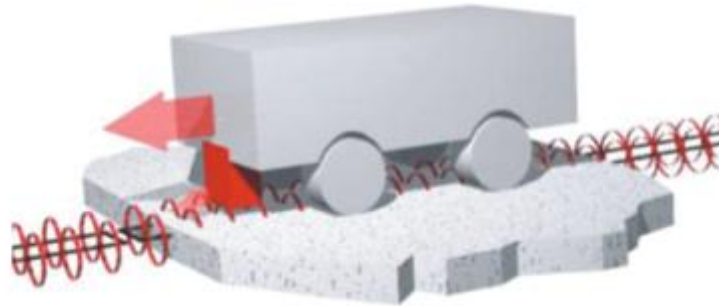
Vaununohjaus eroaa ohjauksen ohjausjärjestelmästä siinä, että se sisältää laitteisto- ja ohjelmistopuolen. Vaununohjauksen käyttöliittymän ja ohjauksen ohjausjärjestelmän tiedonsiirto toteutetaan yleensä WLAN-yhteydellä (Wireless Local Area Network). Vaununohjaus voidaan jakaa omiin lohkoihinsa (turvallisuus, kommunikointi, ajaminen, energianhallinta ja kuorman käsittely). Se on myös yhdistetty esimerkiksi rakennuksen muihin laitteisiin kuten oviin, hisseihin ja liikenne valoihin. Vaununohjaus sisältää myös mahdollisuuden manuaalisen ohjauksen ja opetus tilan käyttöön. [10, s. 142–146]

4.3 Energianlähteet ja renkaat

Vaunun energianlähteeksi on useita erilaisia teknologioita ja niiden yhdistelmiä. Ne tarvitsevat energiaa mekaaniseen liikkumiseen ja sähköisiin järjestelmiin, kuten ohjaukseen ja sensoreihin. Kolmannella aikakaudella käytettiin pääasiassa kolmea tekniikkaa energiansyötössä: lyijy ja nikkeli akut, kontaktiton energiansiirto ja niiden hybridit. Ne ovat toimivia ja käytössä olevia tekniikoita vielä nykypäivänäkin. [10, s. 150]

Akkuja on erilaisia, kuten neste-elektrolyytti lyijyakut, sidotut elektrolyyttiakut (led geeli ja lyijynesteakut) ja neste-elektrolyytti nikkelikadmiumakut. Sopivan akun valinta riippuu käyttötarpeesta. Halvin vaihtoehto on lyijyakut, mutta niiden pitkien latausaikojen (7,5h/vrk) takia niiden käyttö on rajallisempaa. Nikkelikadmiumakut ovat kalliimpia, mutta niiden käyttöikä on pidempi ja niiden suuremman energiatihedyyden vuoksi ne sopivat jatkuvaankin toimintaan. Ne vaativat vähän huoltoa ja niitä ladataan pitkin päivää tai esimerkiksi työpisteillä odottaessa. [10, s. 150–152]

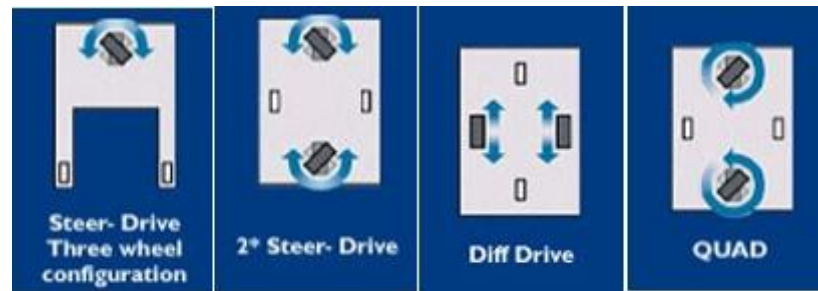
Toinen vaihtoehto energiansyötölle on kontaktiton energiansiirto. Siinä lattiaan on upotettu johtimia, joista saadaan elektromagneettisella kytkennällä siirrettyä energiaa jatkuvasti vaunuun. Tekniikka mahdollistaa pienemmän rakenteen, pidemmän eliniän ja vau-
nut pystytään pitämään toiminnassa jatkuvasti vähäisellä huollolla. Se ei myöskään aiheuta akkujen hävityksestä aiheutuvia ympäristöhaittoja. Kuvassa 8 näkyy lattiassa johtimet, mistä se vastaanottimella (punainen suorakulmio vaunussa) kerää tarvitsemansa energian. [10, s. 152–153]



Kuva 10. Kosketukseton energiansiirtotekniikka [10, s. 102].

Kolmas vaihtoehto on kahden edellisen hybridi. Siinä käytetään kontaktitonta energiansiirtoa pääasiassa ja avustamaan käytetään pieniä akkuja. Tällä mahdollistetaan joustavampi liikehdintä, koska ratojen ulkopuolella on energiaa saatavilla. Myös tilanteissa, joissa lattiasta saatu energia ei ole riittävä, voidaan lisävirtaa ottaa akusta. [10, s. 153]

Sisätiloissa käytettävät vihivaunut käyttävät elastomeerisia renkaita, kuten Vulkollan® (Bayer) tai polyamidi valmisteita. Ne kestävät hyvin kulumista eli lattian pinta pysyy parempana pitkään. Renkaiden määrällä pystytään vaikuttamaan vaunun ohjaukseen ja vähentämään kuorman vaikutuksia. [10, s. 146] Kuvassa 11 on esitetty neljä vaihtoehtoista ja yleisesti käytettyä renkaiden ja niiden akselien sijaintia. Kuvan 1 vasemmalta ensimmäistä konfiguraatiota voidaan ohjata 360°. Toinen konfiguraatio mahdollistaa kääntymisen keskiakselinsa ympäri. Kolmas on yleinen vanhoissa vetovaunuissa. Sen kääntyminen on erittäin rajoitettua. Viimeisellä konfiguraatiolla voidaan kääntyä jokaiseen suuntaan. [20] Erilaisia yhdistelmiä kiinnitystavoista lähtien löytyy paljon ja lisätietoa erilaisista autonomisten robottien renkaiden asettelusta ja malleista löytyy kirjasta ”Introduction to Autonomous Mobile Robots” [12, s. 42–49, 78–79]. Ylimääräisiä renkaita voidaan käyttää myös navigoinnissa apuna kulman ja nopeuden mittauksessa [10].



Kuva 11. Esimerkkejä renkaiden asettelusta ohjausta varten [20].

Vihivaunuissa ja autonomisissa roboteissa voidaan käyttää aivan normaaleja renkaita (paineilmallisia ja ilmattomia) ja esimerkiksi mecanum- (kuva 12, tunnetaan myös Ilon wheelinä) ja omni-tyyppistä rengasta (kuva 13). Näillä renkailla voidaan liikuttaa vaunua tai robottia mihin tahansa suuntaan lattiatasolla. Niiden ongelmana pidetään huonoa tehokkuutta ja korkeata hintaa. Renkaan rakenne mahdollistaa sivuttaissuuntaisen liikkeen. [12] Kuvassa 12 nähdään mecanum rengas ja kuvassa 13 hieman erilainen omni rengas. Omni renkaat ovat enemmän käytössä kevyissä roboteissa kuin vihivaunuissa, juuri huonon tehokkuutensa vuoksi [12].



Kuva 12. Mecanum rengas setti [21].



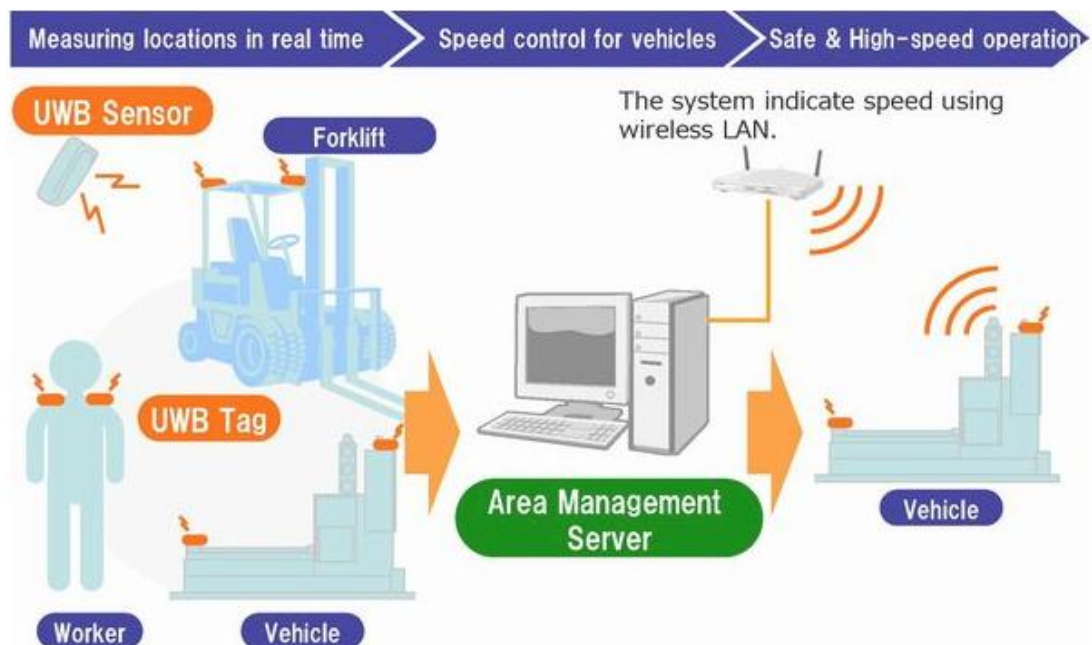
Kuva 13. Omni rengas [22].

Tyypilliseen nykyaikaiseen käyttökoneistoon kuuluu myös sähkömoottori ja pyörän napavaihde renkaiden ja sähkömagneettisten jarrujen ohella. Renkaita ohjaamaan siis käytetään erilaisia sähkömoottoreita. Niiden käyttöjännite on 24 ja 96 V väliltä. [10, s. 149]

5. NELJÄS AIKAKAUSI JA TULEVAISUUS

Neljäs aikakausi vihivaunujen ja autonomisten robottien osalta perustuu kolmanteen aikakauteen. Neljäs aikakausi ajoittuu 2010-luvulle ja jatkuu edelleen. Suurimpia vaikuttajia vihivaunujen ja autonomisten robottien kehittymiseen on halvempien ja älykkäämpien sensorien sekä internetpohjaisten sovellusten kehittyminen. Monet vihivaunuissa käytetyistä tekniikoista ovat tulleet markkinoille älykkäämpien autojen myötä. Esimerkiksi parkkeerausjärjestelmä ja törmäyksen estojärjestelmä pohjautuvat vihivaunuissa käytettyihin tekniikkoihin. Navigointiin ja turvallisuustekniikkoihin on vakiintunut laserteknologia. Akkuteknologian kehittyminen vaikuttaa jatkuvasti käytettävyyden parantumiseen. Tämän aikakauden vihivaunut voivat reagoida puheeseen, ilmoittaa esteistä ja välttää niitä omatoimisesti. Mikäli kuormaa ei ole aseteltu optimaalisesti, niin vihivaunu pystyy ottamaan sen kyytiin siitä huolimatta. [10, s. 165–168]

Vuonna 2014 yritykset Daifuku, UBIsense ja NEDO julkaisivat RFID-pohjaisen teknologian (Radio Frequency Identification), jossa ihmiset ja vaunut tunnistetaan UWB-sensoreilla (ultra wide band). Jokaisella työntekijällä on päällään liivit, joissa on UWB-aktiiviset RFID-merkit. Myös vaunuissa on samanlaiset merkit. [23] Kuvassa 14 nähdään selventävä kuva kyseisestä tekniikasta. Sillä pystytään saavuttamaan suuremmat nopeudet tehtaissa ja varastoissa parantuneen turvallisuuden takia. [24]



Kuva 14. RFID-pohjainen ihmisten ja esineiden tunnistustekniikka [24].

Nykypäivän tuotantolinjoissa käytetään synteettisiä hihnoja, joiden moduulien koko on pienentynyt ja sitä kautta kestävyys ja joustavuus on parantunut entisestään. Synteettiset materiaalit sopivat paremmin, kun tarvitaan suuria nopeuksia. Muoviset modulaariset hihnat ovat hyviä, mikäli järjestelmässä on paljon käännöksiä. Niiden erityisvalttina on helppo jäljitettävyyys esimerkiksi eri värien tai yksityiskohtaisten muotojen mukaan suunniteltujen laskurien avulla. [5]

Nykypäivänä monet yritykset käyttävät FMS järjestelmiä, jotka pystyvät tuottamaan monia eri tuotteita. Nämä järjestelmät saavuttavat saman lopputuloksen, vaikka käytettäisiin eri reittiä. FMS-järjestelmät koostuvat CNC-koneista, automaattisesta materiaalinkäsittelyjärjestelmästä, osan vaihtimesta ja varastointijärjestelmästä. [28] Järjestelmässä on numeerisesti ohjattuja koneita, työstettävän tuotteen vaihtaja (robottikäsi tai jokin muu mekaaninen tuotteen siirrin) ja puskurivarasto osille. Tuotteen siirrossa työstökoneelle voidaan käyttää myös esimerkiksi autonomisia robotteja. Järjestelmässä voidaan käyttää esimerkiksi raiteilla kulkevia nostureita, joissa on esimerkiksi etuhaarukka. Ne voivat tarjoilla korkeilta hyllyiltä tuotteita työstökoneelle ja valmistuessa siirtää sen takaisin hyllylle. Tästä tuotteita voidaan siirtää muualle juuri vihivaunuilla ja erilaisilla kuljettimilla. Työstökoneissa käytetään automaattista työkalun vaihto järjestelmää, joten se voi nopeasti vaihtaa toiseen tuotteeseen. Tällaiset järjestelmät ovat kalliita ja niiden kapasiteetti on rajoitettu, mutta ne voivat toimia ympärivuorokauden, halvemmat yksikkökustannukset ja vaihtaa eri variaatioihin helposti. [11]

5.1 Autonomisoituja varastoja

Viime vuosina varastot ja tehtaat ovat kehittyneet entistä autonomisemmiksi. Erilaisten autonomisten robottien saatavuus on kasvanut ja hinta laskenut. Kiinassa Alibaban varastossa on käytössä 60 Zhu Que -nimistä autonomista robottia, jotka kuljettavat tuotteita varastosta työntekijöille. Varaston koko on 3000 m², mikä veisi ihmiseltä huomattavasti aikaa. Autonomiset robotit hoitavat nyt kyseistä varastoa, minkä ansiosta työtehokkuus on kolminkertaistunut. Varastossa käytetyt Zhu Que -robotit käyvät itse lataamassa itsensä. Puolentoista tunnin latauksella ne pystyvät toimimaan kahdeksan tuntia. Ne käyttävät kommunikointiin Wi-Fi-yhteyttä (Wi-Fi tavaramerkki). Niissä on laser tunnistus törmäyksien välttämiseksi. Zhu Que -robotti pystyy siirtämään jopa 600 kg ja niiden maksiminopeus on 1.5 m/s. Fyysiset mitat ovat 90cm*70cm*30cm. Nämä 30cm korkeat robotit pystyvät pyörittämään paikallaan pyörittämättä hyllyä sen pinnalla olevan pyörätysmekanismin vuoksi, joten ne pystyvät siirtämään tuotteita ahtaamissakin paikoissa. Kuvassa 15 nähdään Zhu Que -robotteja ja hyllyjä, joita se voi nostaa ja liikutella. [25]



Kuva 15. Zhu Que robotteja Alibaban varastossa Kiinassa [25].

Amazon on yksi autonomisten robottien suurimmista käyttäjistä 45000 robotillaan vuonna 2017. He sanovat lisäävänsä 15000 robottia joka vuosi. Amazon käyttää Kiva-nimisiä robotteja, jotka ovat lähes samanlaisia kuin Zhu Que -robotit. Amazon on myös kokeillut onnistuneesti lennokkien käyttöä toimituksissa, joten niiden lisääntyminen tulevaisuudessa varastoissa ja toimituksissa tulee kasvamaan. [26]

Amazonin automaatio on tehokasta. Se tarvitsee vain noin minuutin ajan ihmisen apua tavarantoimittamiseen hyllystä, pakkaamaan sen ja lähettämään sen. Kiva-robotit siis hoitavat varastoa ja saadessaan käskyn tavarantoimittamisesta työpisteellä X, niin se kuljettaa oikean hyllyn oikealle työpisteelle. Työpisteellä työntekijä ottaa tuotteen/tuotteet ja laittaa ne järjestelmän osoittamaan laatikkoon. Kun tuote on skannattu laatikkoa varten, lähtee hylly tilanteen mukaan liikkeelle seuraavaan paikkaansa. Laatikot lähtevät tuotantolinjaa pitkin seuraavalle työpisteelle. Matkalla järjestelmä ilmoittaa oikeankokoisen laatikon pakkausta varten työntekijälle. Työntekijä pakkaa tuotteen ja pistää sen takaisin linjalle. Myöhemmin linjalla robottikäsi leimaa laatikon lopullisen päämäärään laatikon liikkeessä. Tuotantolinjalle asennetut laserit tunnistavat mihin rekkaan laatikko pitää ohjata ja sen mukaan ohjaa ne oikealle reitille. Päätepisteellä työntekijä pakkaa laatikot rekkaan. [27]

5.2 Tulevaisuuden tekniikoita autonomisissa roboteissa ja tehtaissa

Industry 4.0 tuo mukanaan esineiden internetin, joka mahdollistaa paremman kommunikation esineiden ja laitteiden välillä. Se mahdollistaa eri järjestelmien integraation, jonka seurauksena tehokkuus paranee. Esineiden internetin uskotaan mahdollistavan huollon

ennakoinnin ja kohdistamisen järjestelmissä. Se mahdollistaa myös tiedon analysoinnin pilvessä. Industry 4.0 uskotaan parantavan järjestelmien optimointia ja analysointia. [29]

Tulevaisuudessa kolmen teknologian odotetaan parantavan nykyaikaisia autonomisia robotteja. Ensimmäinen niistä on LiDAR-tunnistimet (Light Detection and Ranging) eli sensori, joka tunnistaa valon ja sen vaihteluvälin. Kyseinen tunnistin lähettää laserimpulssi kokoelman, joka mittaa objektien etäisyydet vaunusta. Saadulla datalla luodaan 360° ympäristökaavio. Kyseinen ympäristökaavio tai -kartta mahdollistaa autonomisen robotin liikkumisen vapaasti. LiDARilla saadaan järjestelmään joustavuutta ja entistä älykkäämpiä järjestelmiä. LiDAR on ollut markkinoilla jo jonkin aikaa, mutta sen hinnan lasku alkaa mahdollistaa sen käyttämisen erilaisissa järjestelmissä tulevaisuudessa. Toinen teknologia on kamerapohjainen konenäkö. Yhdistettynä kamerapohjainen konenäkö LiDAR-tunnistimiin, voidaan luoda täydellinen dynaaminen 3D-kuva käyttöalueesta. Kolmas vaikuttava teknologia on ohjelmistotekniikan kehitys. Se mahdollistaa entistä monimutkaisempien ohjelmistojen teon, mikä taas mahdollistaa oikein toteutettuna entistä parempien vaunujen ja autonomisten robottien hallinnan ja ruuhkanhallinta järjestelmien kehittämisen. [15]

Massachusetts Institute of Technology (MIT) tutkijat ovat kehittäneet kameran, jolla voidaan tunnistaa kulman takana olevan esineen sijainnin ja suhteellisen nopeuden heijastuvan valon avulla. Tekniikkaa kutsutaan CornerCameraksi tai Cornariksi. Se ei vaadi kalliita erikoislaitteita vaan esimerkiksi puhelimen kamera on riittävä. Tekniikan saaminen markkinoille kestää vielä pitkään, mutta siinä on paljon potentiaalia. [30] Kyseinen tekniikka voisi olla sovellettavissa autonomisiin roboteihin esimerkiksi varastoissa ja tehtaissa.

5.3 Lennokit tulevaisuuden tehtaissa ja varastoissa

Nykyaikana on alettu myös kokeilla lennokkeja esimerkiksi toimituksissa ja varastojen inventaarion tyypisiin tehtäviin. Erilaisia lennokkeja on ääretön määrä. Niiden paino voi vaihdella muutamista grammoista ylöspäin jopa useisiin kiloihin. Varastojen ja tehtaiden ominaisuudet rajaavat lennökkien voimalähteeksi sähkömoottorit. Soveltuvien lennökkimalli on helikopteri, mutta varastoissa yleisempiä tulevat olemaan multikopterit, joissa on useampi sähkömoottori ja potkuri. Lennökkien käyttö varastoissa tai tehtaissa ei ole vielä kovin yleistä, joten niissä käytettäviin lennokkeihin ei ole muodostunut vielä standardeja jokaiselle osa-alueelle. Yleisin lennökkien ohjaustapa on radio-ohjaus (RC). Multikoptereissa on autonominen ohjausjärjestelmä, jonka avulla kopteri pystyy ohjaamaan itsensä haluttuun paikkaan helposti. Lennokeissa käytetään harrastajien toimesta myös FPV-tekniikkaa (First-Person View), jossa virtuaalilasien kautta ihminen pystyy näkemään lennokin kameran kuvan koko ajan. [31] Kuvassa 16 nähdään lennokki varastokäytössä.



Kuva 16. Lennokki varastokäytössä [32].

Lennokkien historia ulottuu yhtä kauas kuin ilmailun historia. Erilaisten miehittämättömien lennokkien käyttö suuremmassa mittakaavassa aloitettiin toisen maailmansodan aikoihin. Tuon aikaiset miehittämättömät lennokit painoutuivat kuitenkin sotilastarkoituksiin. [33] Niiden ohjaus varastossa olisi lähes mahdotonta, joten työssä ei käsitellä kuin 2000-luvulla yleistyneet multikopterit, joita voidaan soveltaa työn rajausten sisällä [12]. Ensimmäiset multikopterien testaukset ja prototyypit ovat noin 1900-luvun alusta. Silloin tarvittiin vielä ihmisiä lennokin ohjausta varten. Tietokoneiden ja sähkömoottorien puute oli suuri ongelma. Silloin kuitenkin huomattiin kuitenkin, että yksiroottorista helikopteria on huomattavasti helpompi ohjata, koska paino jakaantuu vain yhdelle roottorille. Näin ollen se oli luontaisesti tasapainossa. [34]

Miehittämättömien lennokkien käyttö automaattisissa järjestelmissä edellyttää autonominen ohjauksen välimatkojen päästä. Lennokkien kehityksessä ensimmäisten etäohjauksen patentoi Nikola Tesla vuonna 1898. [33] Sähkömoottorien, mikroelektroniikan ja mikromekaniikan tulo laitteisiin mahdollisti luotettavien ja tehokkaiden multiroottorien valmistamisen. Nykyajan multikopterit ovat helposti ohjattavissa tietokoneella, koska jokaisella roottorilla on oma sähkömoottorinsa. Tietokoneen tarvitsee vain muuttaa kierroslukumäärää yksittäisissä moottoreissa muuttaakseen asemaansa. [34]

Ardupilot.org:n verkkosivujen mukaan multikopterien rakenteet ovat hyvin saman kaltaisia eri malleissa. Lennokit ovat symmetrisiä ja niissä on yleensä kolme, neljä, kuusi, kahdeksan tai 16 roottoria. Suurempi määrä roottoreita mahdollistaa paremman hyötysuhteen ja pidemmän lentoajan sekä yhden roottorin vikatilanteessa toimintakyvyn ylläpidon. Esimerkiksi neliroottorinen kopteri syöksyy useimmiten maahan, jos yksi roottoreista pettää.

Tämän vuoksi ammattilaiskäytössä on usein kuusi tai kahdeksan roottorinen malli. Huonona puolena roottoreiden määrän kasvaessa on järjestelmän kompleksisuuden kasvu, joka kasvattaa vikaherkkyttä. Propellien pienentyminen aiheuttaa vaadittujen propellien nopeuden kasvattamisen heikentäen lentotehokkuutta, mutta mahdollistaa sulavamman liikehinnän. Lennokeissa voidaan käyttää koaksiaali tekniikkaa, joissa pyörii kaksi roottoria päällekkäin vastakkaisiin suuntiin parantaen kantavuutta ja vakautta samalla teholla. Tämä tekniikka kuitenkin kasvattaa melua ja muita riskejä. Symmetrinen rakenne helpottaa lennokin ohjaamista. Sen vuoksi H, Y ja X -malliset rakenteet ovat yleisiä tai oikeastaan standardeja. Propellit pyörivät samaan suuntaan vastakkaisen propellin kanssa. [35] Kuvassa 17 nähdään neliroottorinen X-mallinen lennokka, joka on varustettu kameralla.



Kuva 17. Neliroottorinen lennokka [36].

Lennokkien rakentamisessa voidaan käyttää monia eri materiaaleja. Lennokin rungon painolla on kuitenkin suuri vaikutus esimerkiksi kulutukseen. Tämän vuoksi hiilikuitu ja lasikuitu rakenteet ovat erittäin suosittuja keveytensä takia. Ne tarjoavat myös vahvan rakenteet, mikä on tarpeellinen etenkin, jos lennokkeja meinataan käyttää siirtelemään kuormia varastoissa tai tehtaissa. Komponenttien kiinnityksessä voidaan käyttää alumiinia. Lennokeissa käytetään usein korkeatehoisia litium pattereita tai akkuja paremman hyötysuhteen takia. Ongelmana on lyhyet lentoajat. Tämän vuoksi akkuteknologian kehitys tulee parantamaan lennokkien käytettävyyttä tulevaisuudessa. [35]

Lennokka sisältää myös moottorin ja nopeuden säätimen sekä ajotietokoneen. Ajotietokone on tietokone, jossa on ohjausalgoritmit. Markkinoilla on useita erilaisia ajotietokoneita, moottoreita ja nopeuden säätimiä, mutta työn laajuuden puitteissa niihin ei perehdytä syvemmin. Lennokkiin on mahdollisuus lisätä erilaisia lisäosia kuten kameroita, paikannuslaitteita ja tarraimia. [35] Lennokkien autonominen lasernavigointi otettiin käyttöön vuonna 2009, milloin lennokit pystyivät lentämään yhdessä törmäämättä toisiinsa ilman ihmisen avustusta. [12]

Vuonna 2016 GEODIS-niminen yritys aloitti suunnittelemaan lennökkien käyttöä varastoissa parantaakseen tehokkuutta, turvallisuutta ja laatua. Testeissä käytettiin järjestelmään kytkettyjä neliroottorisia koptereita, joihin oli asennettu korkea resoluutioiset kamerrat. Testeissä lennokit kuitenkin eivät lentäneet täysin vapaina vaan ne oli kiinnitetty virtajohtimella lattiatasossa kulkevaan autonomiseen robottiin, josta ne saivat virtansa. Testeissä lennokeilla tunnistettiin tuotteita varastossa niiden viivakoodeista. GEODIS yrittää luoda järjestelmän, joka sisältää datan käsittelyn ja raportoinnin reaaliajassa sekä koko arvoketjun. [37] Audin älytehtaissa käytetään joidenkin osien (videolla ohjauspyörä) siirtelyyn lennokkeja [38].

6. YHTEENVETO

Automaattisten materiaalinkäsittelyjärjestelmien kehitys alkoi 1800-luvulla tuotantolinjojen muodossa. 1900-luvulle tultaessa toisen teollisuuden vallankumouksen aikana alkoi tuotantolinjojen ja erilaisten kuljettimien todellinen kehitys Henry Fordin johdolla. 1950-luvulla autoteollisuuden tarpeisiin kehitettiin vihivaunut, jotka mahdollistivat entistä monimuotoisempien tehtaiden ja varastojen syntymisen. Ensimmäiset vihivaunut navigoivat seuraten vaijeria taikka tietyn väristä rataa. Järjestelmien joustavuutta pyrittiin parantamaan ja siihen apua saatiinkin esimerkiksi tietotekniikan ja muun elektroniikan kehittymisestä. Logiikka ohjelmointi mahdollisti järjestelmien selkeyttämisen. Autoteollisuuden kasvu vaikutti huomattavasti etenkin autonomisten robottien kehittämisen tarpeeseen, mutta myös tuotantolinjojen joustavuuden parantamiseen.

1970-luvulla tuotantolinja järjestelmien turvallisuutta alettiin parantaa viranomaisten vaatimuksesta. Sen seurauksena kehitettiin hiljaisempia ja kustannustehokkaampia tuotantolinjoja. Tietokoneet mahdollistivat monimutkaisemmatkin järjestelmät ja järjestelmien kommunikoinnin keskenään. Tämä paransi tuotantolinjojen ja vihivaunujen joustavuutta. Tuotantohihnoissa alettiin käyttää moduuleista koottuja hihnoja ja esimerkiksi kitkaohjausjärjestelmää.

Seuraavat vuosikymmenet olivat autonomisten robottien kehityksen kulta-aikaa. Laser- ja magneettinavigointi mahdollistivat vapaamman ja sitä kautta joustavamman järjestelmän. 2000-luvulle tultaessa pystyttiin autonomisilla roboteilla siirtämään melkein mitä tahansa. Tietoliikennetekniikoiden parannus mahdollisti paremman kommunikaation järjestelmien osatekijöiden välillä, joten pystyttiin luomaan älykkäämpiä kokonaisuuksia. Autonomiset robotit alkoivat käyttää 2000-luvulla 3D-kartoitusta, mikä on tulevaisuudessa merkittävässä roolissa. Tämän ajan järjestelmät pystyvät ajamaan erilaisia varaston ja tehtaan järjestelmiä sekä muodostamaan niistä parhaan toimintasuunnitelman. Autonomiset robotit voivat käyttää energianlähteenä erilaisia akkuja ja kontaktitonta energiansiirtoa.

2010-luvulle siirryttäessä tekniikat ovat pitkälti samoja kuin aikaisemminkin. Suurimpina muutoksina lienevät internetpohjaisten sovelluksien kehittyminen ja esineiden internet. Nykypäivänä esimerkiksi autoteollisuus ja Amazon hyödyntävät paljon erilaisia robotteja ja lennokkeja. Tulevaisuuden autonomisten robottien tietotekninen puoli tulee paranemaan ja esimerkiksi 3D kartoituksessa kokeillaan LiDAR-tunnistimia sekä turvallisuuden parantamiseen esimerkiksi CornerCameraa. Tuotantolinjojen ja kuljettimien kehitys on painottunut tiedonsiirron, sensoritekniikan ja materiaalien kehittymiseen. Tulevaisuuden järjestelmissä erilaisten lennokkien käyttö on lisääntymässä. Tulevaisuuden järjestelmissä avainasemassa ovat muun muassa järjestelmien joustavuus ja luonnollinen älykkyys.

LÄHTEET

- [1] Tilastokeskus, Kansantalous, Saatavilla (viitattu 14.9.2017): http://tilastokeskus.fi/tup/suoluk/suoluk_kansantalous.html.
- [2] Bureau of Economic Analysis, Industry data, U.S Department of Commerce, web page. Available (accessed 14.9.2017): <https://www.bea.gov/iTable/iTable.cfm?ReqID=51&step=1#reqid=51&step=51&isuri=1&5114=a&5102=1>.
- [3] T. Adrian, T. Allen, J. Bowes, Material Handling & Logistics, U.S. Roadmap 2.0, Vol. 2017, Iss. 2.0, 2017, pp. 1–78. http://mhlroadmap.org/userDownloads/MHI_Roadmap2.0-final.pdf.
- [4] D.R. Sule, Manufacturing Facilities: Location, Planning, and Design. 1994, 249 p.
- [5] L. Eitel, Motion Control tips, Differences between conventional belting and plastic modular belting for conveying, web page. Available (accessed 11.11.2017): <http://www.motioncontrolltips.com/differences-conventional-belting-plastic-modular-belting-conveying/>.
- [6] Product handling concepts, The history of conveyors, web page. Available (accessed 11.11.2017): <http://www.phcfirst.com/words-in-motion/2014/6/30/the-history-of-conveyors>.
- [7] Bastiansolutions, Bastian Solutions' Complete Guide to Conveyor Systems, Bastiansolutions, web page. Available (accessed 1.11.2017): <https://www.bastiansolutions.com/blog/index.php/2013/05/16/bastian-solutions-complete-guide-to-conveyor-systems/>.
- [8] T. Swan, Ford's Assembly Line Turns 100: How It Really Put the World on Wheels, Car and driver, Vol. 2013, 2013, Available (accessed 1.11.2017): <https://www.caranddriver.com/features/fords-assembly-line-turns-100-how-it-really-put-the-world-on-wheels-feature>.
- [9] Bastiansolutions, Choosing the right conveyors for your system, Bastiansolutions, web page. Available (accessed 1.11.2017): <https://www.bastiansolutions.com/blog/index.php/2014/02/13/choosing-the-right-conveyors-for-your-system/#.WgTK92cUmUk>.
- [10] G. Ullrich, Automated guided vehicle systems, A Primer with practical applications, Springer, 2015, 1–227 p.
- [11] A History Of Flexible Manufacturing Systems, 2015, Available (accessed 16.11.2017): <https://www.ukessays.com/essays/information-technology/a-history-of-flexible-manufacturing-systems-information-technology-essay.php>

- [12] R. Siegwart, I.R. Nourbakhsh, D. Scaramuzza, Introduction to autonomous mobile robots, 2nd ed. London : MIT Press cop., 2011, 1–453 p.
- [13] M. Edwards, The Difference Between AGVs and Mobile Robots, Cross-Automation, 2016, Available (accessed 15.9.2017): <https://cross-automation.com/blog/difference-between-agvs-and-mobile-robots>.
- [14] AMRs vs AGVs: What's the difference? web page. Available (accessed 23.10.2017): <http://fetchrobotics.com/amrs-vs-agvs/>.
- [15] L. McConney, The Future of AGVs: New Technology to Keep an Eye On, web page. Available (accessed 23.10.2017): <http://www.conveyco.com/future-agvs-new-technology-keep-eye/>.
- [16] Conveyor system with fork trucks, Bastiansolution, Available (accessed 23.11.2017): https://www.bastiansolutions.com/images/default-source/technology/conveyor/conveyor-system-design/conveyor-system-with-fork-trucks.png?sfvrsn=bc6404f3_2.
- [17] NKC: Friction Conveyor System, web page. Available (accessed 11.11.2017): http://www.nkc-j.co.jp/eng/yusoki/y_friction.html.
- [18] NCSU: Material handling Equipment, NCSU, web page. Available (accessed 1.11.2017): http://www4.ncsu.edu/~kay/Material_Handling_Equipment.pdf.
- [19] The parts of NDC Solutions, web page. Available (accessed 11.10.2017): <https://ndcsolutions.com/building-agvs/>.
- [20] Automatic Guided Vehicles (AGV) Drive & Steering Options, Transbotics, web page. Available (accessed 15.10.2017): <https://www.transbotics.com/learning-center/drive-steering>.
- [21] Heavy Duty 8" Mecanum Wheel Set, AndyMark, web page. Available (accessed 15.10.2017): http://files.andymark.com/AM_News_2012-05-15.htm.
- [22] Hangfa QLM40 16" Heavy Duty Omni Wheel, Amazon, web page. Available (accessed 15.11.2017): <https://www.amazon.com/Hangfa-QLM40-Heavy-Duty-Wheel/dp/B00ZF6KMPC>.
- [23] B. Trebilcock, Building the faster, safer AGV, web page. Available (accessed 23.10.2017): http://www.mmh.com/article/building_the_faster_safer_agv.
- [24] Pakwest: The future of automatic guided vehicles (AGVs) just got faster! web page. Available (accessed 26.10.2017): <http://pakwest.com/2015/01/09/1345/>.
- [25] Tracy You for mailonline, Wifi-equipped robots triple work efficiency at the warehouse of the world's largest online retailer , Daily mail online, 2017, Available (accessed 23.10.2017): <http://www.dailymail.co.uk/news/article-4754078/China-s-largest-smart-warehouse-manned-60-robots.html>.

- [26] S. Shead, Amazon now has 45,000 robots in its warehouses, web page. Available (accessed 26.10.2017): <http://www.businessinsider.com/amazons-robot-army-has-grown-by-50-2017-1?r=UK&IR=T&IR=T>
- [27] M. McFarland, Amazon only needs a minute of human labor to ship your next package, web page. Available (accessed 28.10.2017): <http://money.cnn.com/2016/10/06/technology/amazon-warehouse-robots/index.html>.
- [28] FLEXIBLE MANUFACTURING SYSTEMS (FMS), web page. Available (accessed 16.11.2017): <https://www.uky.edu/~dsianita/611/fms.html>.
- [29] S. Banker, An IoT Platform For Material Handling, 2017, web page. Available (accessed 1.11.2017): <https://www.forbes.com/sites/stevebanker/2017/04/05/an-iot-platform-for-material-handling/2/>
- [30] R. Raskar, A. Velten & Mouni G. Bawendi, CORNAR: Looking Around Corners using Femto-Photography, web page. Available (accessed 23.10.2017): <http://web.media.mit.edu/~raskar/cornar/>.
- [31] Lennokkien tyyppejä, nettisivu. Saatavilla (viitattu 26.10.2017): <https://www.ilmailuilitto.fi/laji/lennokit/lennokkien-tyyppaja/>.
- [32] Drone warehouse, web page. Available (accessed 26.10.2017): <https://mfgtalkradio.com/wp-content/uploads/2015/10/drone-warehouse.jpg>.
- [33] Drones: a history of flying robots, web page. Available (accessed 26.10.2017): <https://www.nesta.org.uk/drones-history-flying-robots>.
- [34] HISTORY OF QUADCOPTERS AND OTHER MULTIROTORS, web page. Available (accessed 26.10.2017): <http://www.krossblade.com/history-of-quadcopters-and-multirotors/>.
- [35] Advanced multicopter design, web page. Available (accessed 27.10.2017): <http://ardupilot.org/copter/docs/advanced-multicopter-design.html>.
- [36] Go Pro Karma Drone, web page. Available (accessed 27.10.2017): <http://blazinglist.com/wp-content/uploads/2016/11/Go-Pro-Karma-Drone-Best-Drones-2017.jpg>.
- [37] GEODIS and DELTA DRONE confirm the operational development of a unique solution for warehouse inventory using drones, web page. Available (accessed 1.12.2017): <https://www.geodis.com/geodis-and-delta-drone-confirm-the-operational-dev-@/en/view-2120-communicue.html/1961>.
- [38] AUDI smart factory, web page. Available (accessed 1.12.2017): <https://www.youtube.com/watch?v=otE6CnFUXDA>.